

可见光通信 5G-Polar 码编码 CAP 传输方案

王昕禹,王旭东,吴楠

(大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026)

摘要:为提高可见光信道中短码传输的信道容量,提出一种应用于室内可见光通信(VLC)的极化编码无载波幅相(CAP)调制传输方案。该方案在可见光 CAP 调制基础上引入 5G-Polar 码编码技术,并采用分布式循环冗余校验位辅助的串行抵消列表译码算法,在构建的室内 VLC 传输场景中进行仿真分析。仿真结果表明:低的编码速率和调制阶数、重复模式以及较多的候选路径均可以改善系统可靠性。此外,在误块率为 10^{-3} 时,相比于(2,1,7)卷积码,Polar 码可获得约 6.3 dB 的增益。

关键词:极化码;可见光通信;速率匹配;串行抵消;误块率

中图分类号:TN929.1 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2020)12-0020-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.12.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



5G-Polar code coding CAP transmission scheme for visible light communication

WANG Xinyu, WANG Xudong, WU Nan

(Information Science Technology College, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: In order to improve the channel capacity of short code transmission in the visible light channel, a polarization-coded carrierless amplitude-phase (CAP) modulation transmission scheme for indoor visible light communication (VLC) is proposed. This solution introduces 5G-Polar code coding technology based on visible light CAP modulation, and uses a distributed cyclic redundancy check bit assisted serial cancellation list decoding algorithm. The simulation results show that low code rate and modulation order, repetitive patterns, and more candidate paths can improve system reliability. In addition, when the block error rate is 10^{-3} , compared with the (2, 1, 7) convolutional code, the polar code can obtain a gain of about 6.3 dB.

Key words: polar code; visible light communication; rate matching; serial destructive; block error rate

0 引言

伴随固体照明技术的快速发展,白光发光二极管(LED)以其寿命长、功耗低、噪声小、体积小及可靠性高等优点成为未来照明的主要候选^[1]。同时,LED 的照明和通信特性使其在通信领域中的应用十分广泛。除射频和红外通信技术外,可见光通信(VLC)是一种利用可见光谱域的光作为信息载体在空气中传输光信

号的无线通信技术,其优点是高带宽、高速率、高安全性及无电磁干扰等^[2]。无线载波幅度相位(CAP)调制技术是 20 世纪中期贝尔实验室提出的调制技术,具有高频谱利用率、低成本和低复杂度等优点,已被逐渐应用到 VLC 系统中^[3-8]。

为了降低 CAP-VLC 系统信息传输的差错率并提高可见光信道中短码传输的信道容量,本文引入 5G-Polar 码编码技术^[9],提出一种应用于室内 VLC 的极化编码无载波幅相调制传输方案。

1 5G-Polar 码编码 CAP-VLC 系统

1.1 5G-Polar 码编码结构

本文采用 TS 38.212 协议规定的 5G-Polar 码编码流程,即基于分布式循环冗余校验(CRC)辅助的 5G-Polar 码编码方案,编码流程如图 1 所示。

收稿日期:2020-02-12。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:61371091)资助。

作者简介:王昕禹(1996—),女,汉族,吉林省吉林市磐石市人,硕士研究生,现就读于大连海事大学信息与通信工程专业,本科就读于长春理工大学电子信息科学与技术专业,主要从事室内可见光通信中信道编码工作。



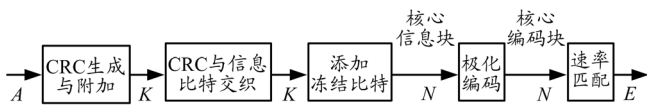


图 1 5G-Polar 码编码流程图

编码流程如下:首先采用协议生成的多项式生成 CRC 校验比特,之后用交织器将 CRC 校验位分散地插入到 A 位信息比特中^[10],得到 K 位的比特序列。在编码之前按照协议添加冻结比特得到序列 N ,之后对序列 N 进行极化编码,最后通过自然速率匹配完成序列从码长 N 到 E 的转换^[11]。

1.2 CAP 传输系统模型

极化码是一类二进制分组码,通常在信号调制之前进行编码,解调之后进行译码。使用 Polar 码的可见光 CAP 系统传输模型如图 2 所示。在发送端,信息序列经过极化编码之后进行星座映射生成含有实部和虚部的复信号,经过 CAP 调制生成二进制信息,再进行极性变换和数/模转换后送到 VLC 信道传输。在接收端,首先对接收到的模拟信号进行模/数转换、极性恢复和 CAP 解调,然后对恢复的信号进行似然比计算,将计算好的似然比发送给极化解码器进行译码判决,最后输出比特流。

1.3 VLC 场景建模

考虑室内可见光视距传输(LOS)情况,VLC 系统以满足朗博体辐射模式的非相干 LED 作为发射源,背景噪声建模选择用加性高斯白噪声(AWGN),室内 VLC 传输场景构建的 LOS 信道仿真参数如表 1 所示,LOS 信道模型如图 3 所示。

在短距离传输中,传输的信号不会因为多径色散产生太大的影响,可以将 LOS 信道直流增益描述为^[12]:

$$h(\varphi, \psi, d) = \frac{A_r(m_1 + 1)}{2\pi d^2} \cos^{m_1}(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos\psi \quad (1)$$

其中, φ 和 ψ 分别为辐射角和接收角($0 \leq \psi \leq \psi_c$), d 为发射机与接收机的距离, A_r 为光电探测器的接收面

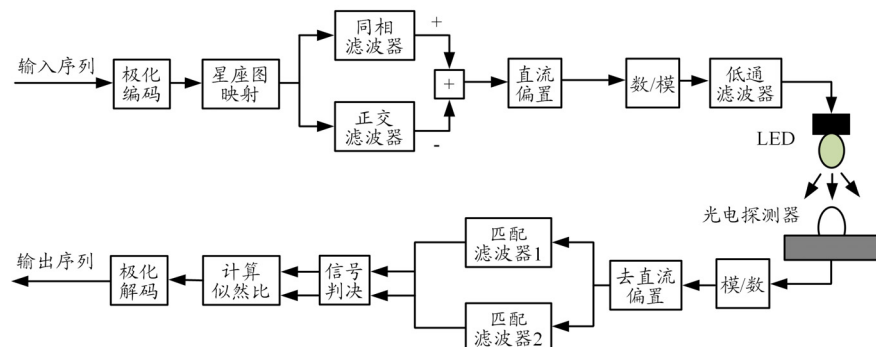


图 2 VLC 5G-Polar 码编码 CAP 传输系统模型

积, m_1 为 LED 的郎伯参数且有 $m_1 =$

$\frac{-\ln 2}{\ln(\cos \varphi_{1/2})}$, $\varphi_{1/2}$ 为发送端半功率角, $T_s(\psi)$ 为光滤波器的增益, $g(\psi)$ 为光集中器的增益。从上述参数可得 LOS 信道衰减系数 h 的值为 2.6×10^{-5} 。

1.4 信号模型

CAP 调制与正交振幅调制(QAM)性能类似,区别是 CAP 用一对正交的匹配滤波器替代载频本振源,这极大地降低了系统的复杂度^[17]。传统二维 CAP 调制采用滤波器组的有限冲激响应表达式如下:

$$\begin{aligned} g(t) &= p(t) \cos(2\pi f_c t) \\ \hat{g}(-t) &= p(t) \sin(2\pi f_c t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, t 表示时间, $g(t)$ 是同相滤波器, $\hat{g}(-t)$ 是正交滤波器, $p(t)$ 是基带脉冲波形, f_c 是调制中心频率。假设 $f_c = 15$ MHz, $p(t)$ 选用根升余弦滤波器,滚降系数设为 0.2,符号传输速率 $1/T$ 设为 25 MHz,本文采用 25 个滤波器抽头。

对于 VLC 系统中的 CAP 信号,需要将调制映射生成的双极性信号进行极性转换,以得到单极性(正值)信号。本方案的极性转换采用直流偏置光 CAP(DCO-CAP)方法,对发送端 CAP 调制器输出的双极性信号加直流偏置 B_{DC} 进行单极化处理,采用式(2)所示的滤波器实现正交传输,输出的实值信号和经过 DCO-CAP 处理的单极性信号的时域波形如图 4 所示,实值信号添加了直流偏置后,将负值信号变成了非负值信号。

表 1 LOS 信道仿真参数

仿真参数	数值
房间尺寸	5 m×5 m×3 m
发射灯位置(x, y, z)	(0, 0, 2.15 m)
发送端半功率角	
半功率角 $\varphi_{1/2}$	70°
发射端仰角 φ	-90°
发射端方位角	0°
接收端距水平面高度	0
接收端仰角 ψ	90°
接收端方位角	0°
接收端有效面积 A_r	1 cm ²

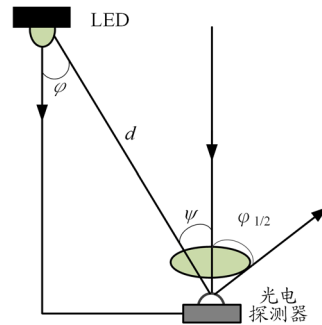
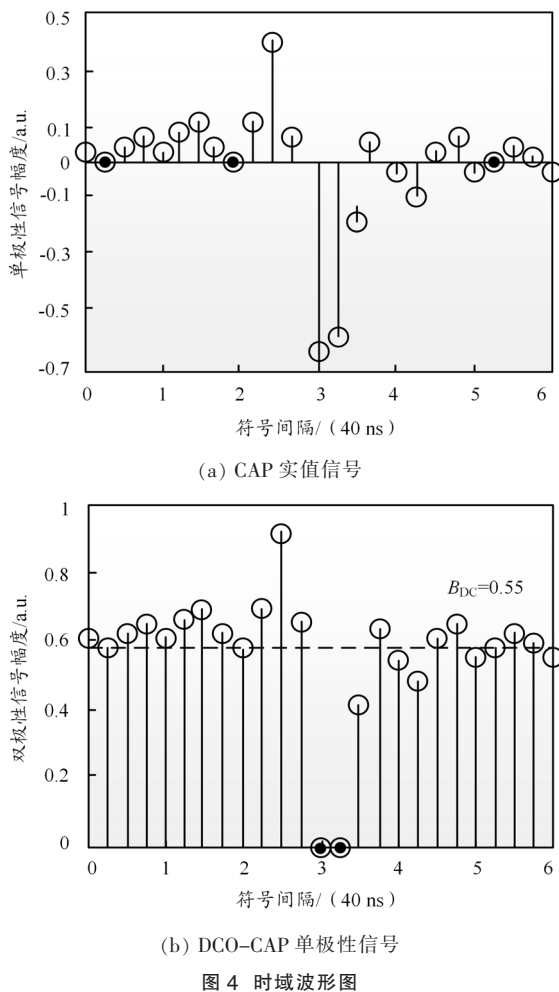


图 3 LOS 信道模型



2 误块率性能分析

在 DCO-CAP 系统中,光功率与直流偏置 B_{DC} 之间存在正相关的关系,如式(3)所示,因为光功率的限制,一般情况下直流偏置的值不会太大,所以会产生限幅噪声。对接收端光电检测器接收到的信号描述如式(4)所示^[12]。

$$B_{DC}=k\sigma_s=k\sqrt{E[s^2(t)]} \quad (3)$$

$$y_{DCO}(t)=h(\varphi,d)\cdot[s(t)+B_{DC}+n_{clip}(t)]+n(t) \quad (4)$$

其中,直流偏置 B_{DC} 与信号标准差 σ_s 的比值可以用 k 来表示^[13], $E[\cdot]$ 表示统计平均运算, $s(t)$ 表示添加 DCO 之前的发送信号, $y_{DCO}(t)$ 为 DCO-CAP 系统接收的信号, $h(\varphi,d)$ 表示信道直流增益, $n_{clip}(t)$ 和 $n(t)$ 分别表示限幅和信道噪声。

由于 B_{DC} 取值足够大时可以去除限幅噪声的影响,考虑到 VLC 信道其独特的传输特性,信道噪声可以建模为 AWGN。因为星座映射的对称性,即 $E[s(t)]=0$,则发送信号的平均能量 E_{sDC} 描述如式(5)所示。

$$E_{sDC}=E[(s(t)+B_{DC})^2]=(1+k^2)E_s \quad (5)$$

其中, E_s 表示符号的能量,比特能量 $E_b=E_s/\log_2^M$,因此发送信号比特的平均能量 $E_{bDC}=(1+k^2)E_b$ 。

对于 $M=2^u$ 进制矩形星座映射,运用空间几何概念得到调制的误块率 P_u 为:

$$P_u \cong \frac{1}{\log_2 \sqrt{M}} (1+2+4+\dots+2^{\log_2 \sqrt{M}-1}) P_c = \frac{2}{\log_2 M} (\sqrt{M}-1) P_c \quad (6)$$

$$P_c = \frac{2}{\sqrt{M}} \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} Q \left[(2i-1) \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right] \quad (7)$$

其中, N_0 为信道噪声。考虑室内可见光视距传输信道情况,系统的误块率为:

$$P_u = \frac{4}{u} \left(\frac{\sqrt{M}-1}{M} \right) \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} \times Q \left[(2i-1) \sqrt{\frac{3b}{M-1} \cdot \frac{E_{bDC}}{N_0} \cdot \frac{h^2(\varphi,d)}{1+k^2}} \right] \quad (8)$$

其中, $\frac{E_{bDC}}{N_0}$ 为系统发送端信噪比,高斯 Q 函数定义

$Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$, 每符号含有的比特数为 $\log_2 M$ 。

$$P_B = 1 - (1 - P_u)^A \quad (9)$$

其中, P_B 为系统的误块率, A 为每数据块的长度。

3 数值仿真分析

为了观察 Polar 码在 CAP-VLC 系统中的误码性能,本文在室内 VLC 传输环境下,对基于 Polar 码的 CAP-VLC 传输系统的误块率进行仿真分析,仿真参数如表 2 所示。同时,仿真选择 LOS 信道为信道环境,AWGN 为背景噪声,信道仿真参数及直流增益如 1.3 节所示。

表 2 系统仿真参数

仿真参数	数值类型
信息块长度/bit	84
编码块长度/bit	136、204、272
速率匹配方式	重复、缩短、打孔
编码速率	1/4、1/3、1/2、2/3
候选路径/条	1、2、4、6、8
调制方式	4CAP、8CAP、16CAP
信道模型	LOS 信道
DC 偏置/dB	1.1

3.1 编码速率对系统性能的影响

系统在采用重复模式的速率匹配方式如图 5 所示。可以看出,编码速率越低,信息比特所在的信道可靠性越高,系统译码性能越好。在误块率为 10^{-4} 时,1/4 编码速率的 CAP 系统分别优于 1/3、1/2 及 2/3 编码速率的 4CAP 系统约 0.5 dB、0.7 dB 及 1.3 dB。

3.2 速率匹配模式对系统性能的影响

设定系统采用相同的调制方式和候选路径,研究 4CAP 系统在不同的速率匹配模式下的译码性能,仿真结果如图 6 所示。当序列长度 E 分别取 136、204 和 272 时,速率匹配模式分别为缩短、打孔及重复模式,可以看出,重复模式性能最好,其次是打孔模式,最差为缩短模式。这是由于系统采用速率匹配模式不同,其编码速率也随之不同,重复模式因其低编码速率,译码性能要好于打孔模式和缩短模式。在误块率为 10^{-3} 时,重复模式的 4CAP 系统分别优于打孔模式和缩短模式的 4CAP 系统约 0.5 dB、1.8 dB。

3.3 调制阶数对系统性能的影响

在采用重复速率匹配模式且候选路径和编码速

率相同的条件下,不同调制方式对系统性能的影响如图 7 所示。可以看出,在一定信噪比下,随着调制阶数的减少,系统性能有明显的改善。由于信号星座点数的增加,星座点之间的间隔距离减少,会导致系统误块率的增加,因此系统采用高阶调制时可靠性降低。在误块率为 10^{-4} 时,4CAP 系统分别优于 8CAP 系统和 16CAP 系统约 4.7 dB 及 7 dB。

3.4 候选路径对系统性能的影响

采用重复速率匹配模式且在编码速率和调制方式相同的条件下,不同的候选路径对 4CAP 系统性能的影响如图 8 所示。可以看出,系统的可靠性随着候选路径 L 的增加得到了改善。当误块率为 10^{-4} 时,相对于 $L=1$ 和 $L=2$, $L=4$ 的性能分别提高约 1.5 dB 和 0.5 dB。但是随着候选路径 L 的增加,会增大译码复杂度,降低译码取得的增益,因此不能单纯地考虑增加译码候选路径,对候选路径数量的选取应折衷考虑。

3.5 编码方式对系统性能的影响

在编码速率和调制方式相同的情况下研究不同编码方式对系统的影响如图 9 所示。可以看出,Polar

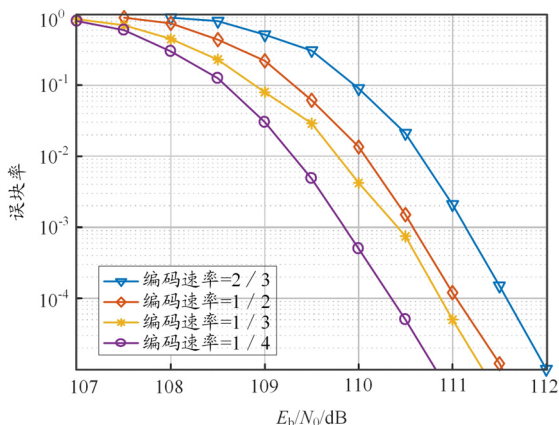


图 5 重复模式下不同编码速率的误块率

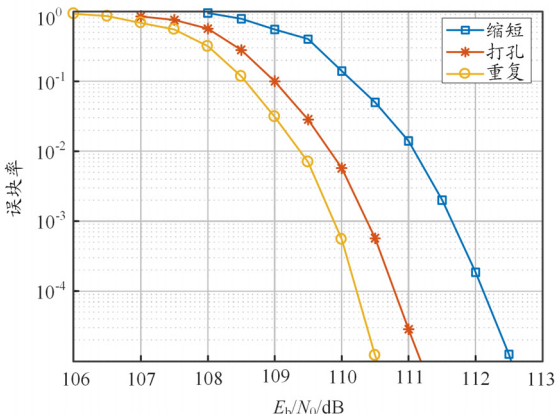


图 6 不同速率匹配模式下的误块率

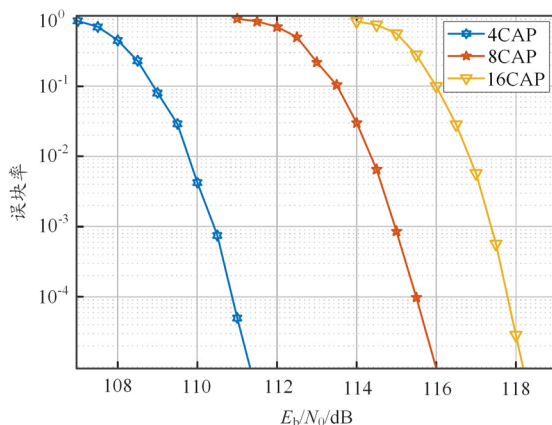


图 7 不同调制方式下的误块率比较

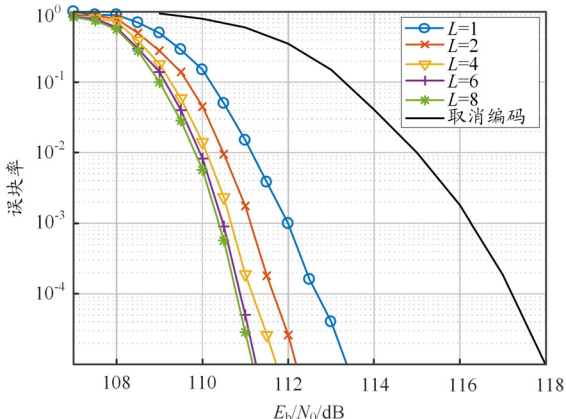


图 8 候选路径对误块率的影响

王昕禹,王旭东,吴楠:可见光通信 5G-Polar 码编码 CAP 传输方案

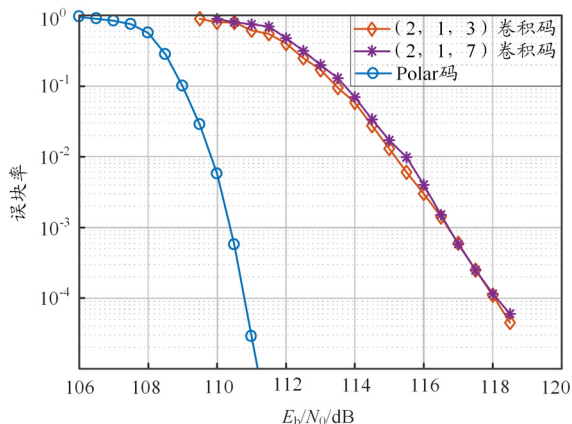


图9 不同编码方式下的误块率比较

码对系统性能的改善明显要优于卷积码,并且在误块率为 10^{-3} 时,相比于(2,1,7)卷积码,Polar 码获得约 6.3 dB 的增益。

4 结束语

在背景噪声为 AWGN 的通信系统中,本文针对 LOS 信道提出了 VLC 5G-Polar 码编码 CAP 传输方案,给出了 5G-Polar 码的编译码原理和系统传输模型,最后对系统在不同条件下的误块率进行仿真。仿真结果表明:编码速率越低系统性能越好;重复模式在低编码速率的影响下性能最好;高阶调制映射会导致系统译码性能下降;候选路径的增加会提高译码可靠性,与此同时也会增加译码复杂度,选择合适的候选路径即可。此外,Polar 码在系统中的表现明显优于卷积码,并在误块率为 10^{-3} 时获得约 6.3 dB 的增益。由此可见,该传输方案提高了信号在 VLC 系统中传输的可靠性。

参考文献:

[1] PATHAK P H, FENG X, HU P, et al. Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges [J]. IEEE

Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2047–2077.

[2] WU D, ZHONG W D, GHASSEMLOOY Z, et al. Short-range visible light ranging and detecting system using illumination light emitting diodes [J]. Iet Optoelectronics, 2016, 10(3): 94–99.

[3] SUN L, DU J B, HE Z Y. Multiband three-dimensional carrierless amplitude phase modulation for short reach optical communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(13): 3103–3109.

[4] WANG Y G, LI T, HUANG X X, et al. 8-Gb/s RGBY LED-based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1–7.

[5] WANG Y, TAO L, HUANG X, et al. 8-Gb/s RGBY LED based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1–1.

[6] WU F M, LIN C T, WEI C C, et al. 3.22-Gb/s WDM visible light communication of a single RGB LED employing carrier-less amplitude and phase modulation [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 19–21, 2013, Los Angeles, USA. California: OFC, 2013: 1–3.

[7] WANG Y G, LI T, WANG Y Q, et al. High speed WDM VLC system based on multi-band CAP64 with weighted pre-equalization and modified CMA based post-equalization [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(10): 1719–1722.

[8] 王旭东,崔玉,吴楠,等. 室内可见光多维 CAP 空间调制[J]. 发光学报, 2018, 39(2): 227–235.

[9] ARIKAN E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051–3073.

[10] HISILICON. Summary of polar code design for control channels (R1-1700088) [EB/OL]. (2017-01-10)[2020-02-12]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSG_R1_AH/NR_AH_1701/Docs/.

[11] ERICSSON. Puncturing and repetition of polar codes (R1-1707077) [EB/OL]. (2017-05-07)[2020-02-12]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSG_R1_89/Docs/.

[12] 王旭东,崔玉,吴楠,等. 室内可见光无载波幅度相位调制系统性能分析[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 109–118.

[13] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(7): 1063–1072.